

Protocolo de análisis tectónico estructural para la caracterización de potenciales almacenamientos geológicos de CO₂ (Proyecto TECTO2)

Tectonic and structural protocol for the characterization of potentially CO₂ geological storage (TECTO2-project)

J. L. Giner-Robles¹, R. Pérez-López¹, J. J. Martínez-Díaz², M.A. Rodríguez-Pascua³, M.A. Perucha³, C. Paredes⁴, R. de la Vega⁴, R. Campos⁵, A. Arenillas³, I. Suárez³, J. Sastre³ y J.M. González-Casado^{6†}

1 Dpto. de CC. Ambientales, Facultad de Farmacia. Universidad de San Pablo CEU. Madrid 28668. Spain. jlginer@ceu.es, rperez.fcex@ceu.es

2 Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas. UCM. Avda. Complutense s/n, Madrid 28040, jmdiaz@geo.ucm.es

3 Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. Madrid 28003, ma.rodriguez@igme.es, ma.perucha@igme.es

4 Dpto. de Matemática Aplicada y Recursos Informáticos. ETSI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid.

5 CIEMAT. Avda. Complutense, 22. Madrid 28040, rocio.campos@ciemat.es

6 Dpto. de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.

Resumen: En el contexto del proyecto TECTO2 (CGL2006-28134-E/CLI) se está realizando un protocolo de análisis tectónico estructural para la caracterización de almacenamientos geológicos de CO₂. Este protocolo surge de la necesidad de estructurar y caracterizar una serie de metodologías que permitan cuantificar diferentes variables de carácter tectónico-estructural, de forma que se pueda establecer la idoneidad de una zona para el emplazamiento de un almacenamiento geológico de CO₂. Este protocolo se pretende definir unos parámetros tectónico-estructurales a partir de: 1) el establecimiento de tres escalas de análisis, 2) la definición de los factores y variables que deben ser cuantificados en cada una de las escalas de análisis, y por último, 3) en las diferentes metodologías necesarias para cuantificar esas variables. Para cada una de las escalas de trabajo, el protocolo TECTO2 describe la secuencia de aplicación de las metodologías necesarias para cuantificar las variables adecuadas para la correcta caracterización tectónico-estructural de un almacenamiento geológico de CO₂, aplicables también para el posterior seguimiento y control del emplazamiento.

Palabras clave: Protocolo de análisis, tectónica, análisis estructural, almacenamientos de CO₂.

Abstract: The main-frame of the TECTO2-project (CGL2006-28134-E/CLI) faces the role of several tectonic and structural parameters in order to be considered for the geological storage of CO₂. Accordingly, we propose the TECTO2 protocol from 1) the selection of the scale of analysis, 2) a complete definition of variables in each scale defined previously and 3) the methodology to quantify these variables in each scale. TECTO2 protocol proposes a new sequence to apply in three scales, labelling the tectonic and structural variables to be considered for CO₂ storage and the ongoing study and monitoring of the emplacement.

Key words: TECTO2 protocol, tectonic, structural analysis, CO₂ reservoir.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las directrices europeas sobre emisiones de CO₂ y su aplicación en España con el nuevo Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión de CO₂ para el período 2008-2012, hace necesario el desarrollo de metodologías y protocolos que permitan definir las zonas más adecuadas técnicamente para el emplazamiento de almacenes geológicos de CO₂. Evidentemente, esta caracterización geológica debe acometerse desde muchas disciplinas científicas.

En este ámbito, una de las disciplinas más importantes en cuanto a la caracterización geológica es el análisis tectónico-estructural. Este análisis debe realizarse de forma jerarquizada, de forma que permita definir, a diferentes escalas, la idoneidad de diferentes zonas frente a la selección de emplazamientos

geológicos. No obstante, este análisis debe estar directamente relacionado con otras disciplinas de manera que este protocolo tectónico-estructural sólo se aplique en las zonas más adecuadas desde el punto de vista sedimentario; es decir, necesitamos una primera evaluación de las características de las diferentes zonas, bien desde la perspectiva de la capacidad de almacenamiento, o bien, desde las características estratigráficas y sedimentológicas.

Las metodologías aplicadas en este tipo de análisis son similares a las utilizadas y definidas para la caracterización de emplazamientos geológicos *sensu lato*; no obstante, dadas las características particulares del CO₂, se hace necesaria una revisión sobre las condiciones de carácter tectónico estructural.

En este aspecto el proyecto TECTO2 (*Protocolo de análisis tectónico estructural para la caracterización de*

almacenamientos geológicos de CO₂) pretende establecer un protocolo de análisis (Protocolo TECTO2) de forma que, aplicando una serie de metodologías de análisis tectónico estructural, se puedan definir una serie de factores evaluables que permitan establecer matrices de decisión para la correcta selección y análisis de emplazamientos de este tipo.

PROTOCOLO TECTO2

El protocolo de análisis consiste en la caracterización cuantitativa y/o cualitativa de una serie de variables, aplicando de forma jerarquizada metodologías de análisis estructural en función de la escala de trabajo.

Por lo tanto, en la definición del protocolo TECTO2 se tienen en cuenta una serie de factores: 1) la escala del análisis; 2) las variables tectónico-estructurales que permitan cuantificar la adecuación de la zona considerada (geometría y cinemática de las fallas, densidad de fracturación, etc.); 3) y por último, las metodologías de análisis adecuadas a cada una de las escalas, que permitan, mediante su aplicación, la definición de cada una de las variables consideradas (análisis poblacional de fallas, análisis de mecanismos focales, etc.).

1) ESCALA DE ANÁLISIS

La correcta selección del emplazamiento debe realizarse partiendo desde el análisis de grandes unidades morfoestructurales, hasta llegar a la escala de formación o emplazamiento. En el protocolo TECTO2, se han considerado inicialmente tres escalas de análisis: 1) análisis regional (1:500.000-1:200.000); 2) análisis local (1: 100.000- 1:50.000), y 3) análisis de emplazamiento (1:10.000-1:2.000).

Estos tres intervalos de escala han sido asignados de forma preliminar, basándose en las escalas de análisis aplicadas en diferentes proyectos de almacenamientos geológicos de CO₂ en activo como Weyburn (Wilson y Monea, 2004). No obstante, es evidente que las escalas de trabajo consideradas en cada uno de estos proyectos, están íntimamente relacionadas con la extensión y la capacidad de almacenamiento de cada zona en particular. Por lo tanto, se deben revisar las escalas de trabajo en cada caso particular, dependiendo de la capacidad y localización de las posibles zonas de emplazamiento con respecto a las fuentes emisoras y a los sistemas de transporte considerados.

Para poder caracterizar adecuadamente la idoneidad de cada área considerada, es necesario establecer con anticipación las escalas de trabajo. De esta forma, se puedan definir con precisión las diferentes variables que deben ser cuantificadas en cada una de las escalas.

2) DEFINICIÓN DE VARIABLES

Una vez definidas las escalas de análisis, es necesario definir las variables que deben ser cuantificadas en la aplicación del protocolo. En el protocolo TECTO2, se han considerado dos tipos de variables (Fig. 1): a) *variables evaluables*, son aquellas que permiten cuantificar directamente la calidad de la zona considerada; y b) *variables no evaluables*, aquellas que, no pudiendo utilizarse para definir la calidad de la zona como emplazamiento, deben cuantificarse para poder definir las variables de carácter evaluable.

En cada una de las escalas de análisis se deben cuantificar las variables evaluables. Esta cuantificación puede ser de carácter cualitativo (e.g. actividad de una falla), y/o de carácter cuantitativo (e.g. densidad de fracturación, estado crítico, etc.). Una vez cuantificadas, debe establecerse, para cada escala de análisis, la favorabilidad de la zona analizada frente a esa variable (Fig. 1): *variables favorables*, *variables excluyentes*; y *variables condicionantes*. Las variables favorables son aquellas que no desaconsejan la elección de la zona como almacenamiento; las excluyentes serían las que descartan como emplazamiento esa zona con respecto a la variable analizada; y las variables condicionantes, son aquellas que, no siendo excluyentes, necesitan un análisis más específico en cuanto a metodologías aplicadas o a escalas más detalladas, para que se pueda definir definitivamente su carácter favorable o excluyente.



FIGURA 1. Variables consideradas en el protocolo de análisis: variables evaluables (favorables, excluyentes o condicionantes) y variables no evaluables (ver texto para explicación)

En la figura 2 se puede ver un ejemplo de las diferentes variables definidas en el protocolo. En este caso, la variable evaluable sería la actividad que presentan las fallas situadas en la zona de análisis, actividad que puede afectar a la integridad micro y macroestructural del emplazamiento.

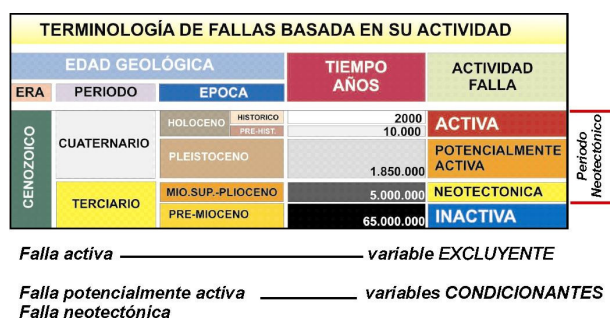


FIGURA 2.. Ejemplo de la definición de las diferentes variables en función de la actividad de una falla a escala de análisis local (ver texto para explicación).

La caracterización preliminar de esta variable, de carácter cuantitativo, estaría definida por la actividad de una falla en función del tiempo (Fig. 2): *falla activa* sería aquella que ha tenido actividad durante el Holoceno; *falla potencialmente activa*, con actividad durante el Pleistoceno; *falla neotectónica* sería toda aquella que presenta actividad durante el periodo neotectónico; entendiendo periodo neotectónico al periodo de tiempo comprendido desde la instalación del tensor de esfuerzos actual hasta el presente. Y por último, la *falla inactiva* sería aquella que no presenta actividad durante ese periodo neotectónico. Para poder establecer que fallas pueden considerarse neotectónicas o inactivas, sería necesario establecer antes el periodo neotectónico. Para ello, debemos conocer la evolución del estado de esfuerzo y/o deformación en el tiempo. Para definir esa evolución hay que cuantificar los tensores de esfuerzo/deformación actual y reciente. Estas variables serían de carácter no condicionante, ya que no se utilizarían directamente en la caracterización de la zona, pero serían necesarias para la determinación de las variables evaluables.

En el caso específico del protocolo TECTO2, aplicado al análisis tectónico-estructural, es importante resaltar las diferentes variables relacionadas con: los mecanismos de deformación y la estructura tectónica de la zona, aspectos siempre apoyados en datos geofísicos. No obstante, los factores determinantes en este tipo de análisis hacen referencia fundamentalmente a la caracterización de la fracturación (geometría, cinemática, dinámica, distribución, complejidad espacial, etc.) (Bentham y Kirby, 2005), y sobre la actividad de las fallas (edad de la deformación, sismicidad, estado crítico, etc.).

3) METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

Una vez definidas las diferentes variables a cuantificar en cada una de las escalas de trabajo, se deben establecer las diferentes metodologías que deben aplicarse. En muchos casos, las metodologías necesarias se aplican de forma análoga a las diferentes escalas de análisis, considerando únicamente, el diferente grado de jerarquización de los datos. Por ejemplo, en el caso del análisis de la densidad de fracturación, es necesario considerar la escala de las trazas de las fallas; por eso en muchos casos se suelen utilizar modelos digitales del terreno (MDT) o imágenes

de satélite con diferentes resoluciones (Stephenson *et al.*, 2007).

Las metodologías aplicadas en este protocolo están relacionadas fundamentalmente con:

- *Análisis de la fracturación*: análisis geofísico; análisis tectónica-sedimentación; análisis de imágenes y MDT (Stephenson *et al.*, 2007); análisis de la distribución y complejidad de la red de fracturación mediante técnicas fractales (Pérez-López *et al.*, 2005), etc.

- *Análisis de la sismicidad*: análisis de la distribución 2 y 3D, análisis de mecanismos focales (Giner-Robles *et al.*, en prensa), análisis de la disipación de energía, etc.

- *Análisis del estado de esfuerzo/deformación (in situ, actual y reciente)*: análisis poblacional de fallas, análisis ponderado de mecanismos focales, análisis de estado crítico en fracturas etc.

- *Análisis sismotectónico*: análisis de fallas activas, fallas simogénicas, deformaciones cosísmicas, etc.

APLICACIÓN DEL PROTOCOLO TECTO2

Estas metodologías se organizan y jerarquizan en cada una de las escalas de análisis, para optimizar el trabajo y así cuantificar de forma adecuada las diferentes variables consideradas (Fig. 3). Muchas de estas metodologías han sido aplicadas en diferentes trabajos con el objetivo, bien de caracterizar la fracturación (De Vicente *et al.*, 1997), o bien analizar el estado de esfuerzo/deformación mediante el análisis tanto de datos geológicos, como geofísicos (Herraiz *et al.*, 2000)

En el contexto del proyecto se pretende aplicar algunas de estas metodologías a zonas concretas que presentan una densidad de datos lo suficientemente alta para que su aplicación sea inmediata. Además, se pretende calibrar el protocolo en zonas en las que se localizan acuíferos salinos profundos con confinamiento natural de CO₂ (análogos naturales).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto TECTO2 (CGL2006-28134-E/CLI).

REFERENCIAS

- Bentham, M. y Kirby, G. (2005): CO₂ Storage in Saline Aquifers. *Oil & Gas Science and Technology*, 60 (3): 559-567.
- De Vicente, G., Herraiz, M., Giner-Robles, J.L., Lindo, R. y Muñoz-Martín, A. (1997): Simulación del medio geológico: técnicas estructurales y sedimentológicas. *Publicación Técnica (ENRESA)*, 03/97, 45 p.
- Giner-Robles, J.L., Pérez-López, R.; Martínez-Díaz, J.J., Rodríguez-Pascua, M.A y González-Casado,

- J.M. (en prensa): Present-day strain field on the South American slab underneath the Sandwich Plate (Southern Atlantic Ocean): a kinematic model. *Geol. Soc. London, Sp. Iss.*
- Herraiz, M., De Vicente, G., Lindo-Ñaupari, R., Giner-Robles, J.L., Simón, J.L., González-Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, A.L., Ramírez, M. y Lucini, M. (2000): A new perspective about the recent (Upper Miocene to Quaternary) and present tectonic stress distributions in the Iberian Peninsula: *Tectonics*, 19 (4): 762-786.
- Mildren, S.D., Hillis, R.R., Dewhurst, D.N., Lyon, P.J., Meyer, J.J. y Boulton, P.J. (2005): FAST: A new technique for geomechanical assesment of the risk of reactivation-related breach of fault seals. En: *Evaluating fault and cap rock seals* (P. Boulton y J. Kaldi, Eds.). AAPG Hedberg Series, 2, 73-85.
- Pérez-López, R., C. Paredes y A. Muñoz-Martín (2005): Relationship between the fractal dimension anisotropy of the spatial faults distribution and the paleostress fields on a Variscan granitic massif (Central Spain): the F-parameter. *Journal of Structural Geology*, 27: 663-677.
- Stephenson, B.J., Koopman, A.; Hillgartner, H., Maquillan, H., Bourne, S., Noad, J.J. y Rawnsley (2007): Structural and stratigraphic control on Fol.-related fracturing in the Zagros Mountains, Iran: implications for reservoir development. En: *Fractured reservoirs* (L. Lonergan, Lolly, R.J., Rawnsley, K y Sanderson, D.J., eds.). The Geological Society of London, Special Publications, 270, 1-21.
- Wilson, M. y Monea, M. (eds.) (2004): IEA GHG Weyburn CO2 monitoring and storage Project summary report 2000- 2004. Proceedings of the 7th international conference on greenhouse gas control technologies. Vancouver, Canada, 273 p.

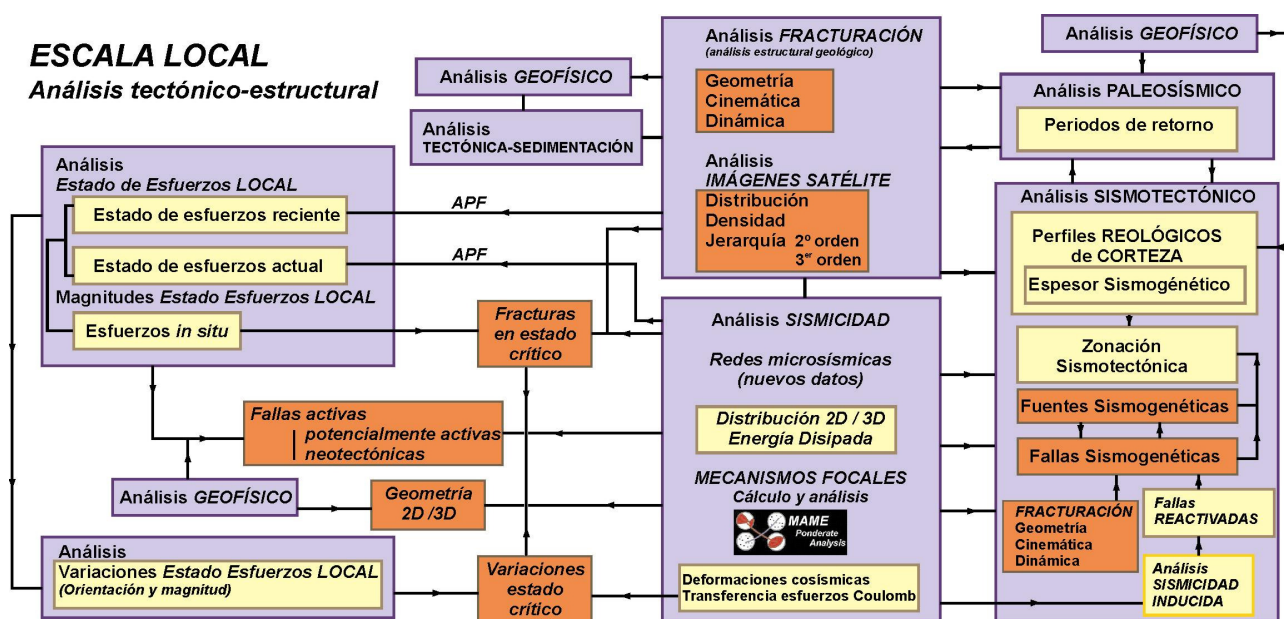


FIGURA 3. Organigramma del protocolo de análisis tectónico estructural a escala local, en azul las metodologías, en amarillo las variables no evaluables y en naranja las variables evaluables.